

Avaliação do desgaste de peças produzidas por manufatura aditiva FDM**Evaluation of the wear of parts produced by additive manufacture FDM**

DOI:10.34117/bjdv5n12-288

Recebimento dos originais: 07/11/2019

Aceitação para publicação: 19/12/2019

Juliana Norenberg de Araújo

Engenheira de Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa, mestranda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Paraná.

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Rua Barbosa Lima, 334 – Uvaranas, Ponta Grossa – PR, Brasil.

E-mail: juliananorenbergdearaujo@hotmail.com

Fabiano Oscar Drozda

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná

Instituição: Universidade Federal do Paraná

Endereço: Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba - PR, Brasil.

E-mail: fabiano.drozda@gmail.com

RESUMO

A utilização da impressão 3D tem inovado os processos produtivos convencionais, modificando as estratégias de produção empregadas atualmente devido à economia de materiais e redução de etapas do processo de fabricação. Desenvolvimentos de novos materiais, em geral filamentos termoplásticos, estão sendo inseridos no mercado para aplicação neste tipo de técnica de fabricação e desta forma tornam-se cada vez mais necessários estudos de caracterização experimentais dos materiais para fornecer dados técnicos aos utilizadores. O objetivo deste estudo é avaliar o desgaste de peças poliméricas de ABS produzidas por impressão 3D FDM. Para isto foram impressos corpos de prova utilizando-se a tecnologia de modelagem por fusão e deposição (FDM) e estes foram submetidos a ensaios de desgaste pino sobre disco aplicando-se a carga de 10 N com velocidade de deslizamento de 0,10 m/s para a distância de deslizamento de 40 metros, em temperatura ambiente. Os resultados dos ensaios são apresentados sob a forma de perda de volume em milímetros cúbicos, onde os corpos de prova perderam em média 0,06% do seu volume após o desgaste.

Palavras-chave: Manufatura aditiva; Modelagem por fusão e deposição; Impressão 3D; Acrilonitrila Butadieno Estireno; Desgaste.

ABSTRACT

The use of 3D printing has innovated the conventional production processes, modifying the production strategies currently employed due to the saving of materials and reduction of stages of the manufacturing process. Developments of new materials, in general thermoplastic filaments, are being inserted in the market for application in this type of manufacturing technique and in this way it becomes increasingly necessary experimental characterization studies of the materials to provide technical data to the users. The objective of this study is to evaluate the wear of ABS polymeric parts produced by 3D FDM printing. For this purpose, samples were printed using the FDM technology and were subjected to tests of wear on the disk by applying a load of 10 N with a speed of 0,10 m/s for the slip distance of 40 meters at room temperature. The results of the tests are presented as loss of volume in cubic millimeters, where the specimens lost an average of 0.06% of their volume after wear.

Keywords: Additive manufacturing; Modeling by fusion and deposition; 3D printing; Acrylonitrile Butadiene Styrene; Wear.

1 INTRODUÇÃO

A Impressão 3D, também conhecida por manufatura aditiva, é um “processo de construção de objetos tridimensionais sólidos, a partir de um modelo 3D, através da adição de camadas” (ASTM International, 2013).

A primeira impressora 3D foi desenvolvida por Charles Hull (co-fundador da empresa americana 3D systems) e a técnica de obtenção de peças foi denominada estereolitografia (SL), também conhecida por SLA (stereolithography apparatus) (Hull; Arcadia, 1986).

Dentre os materiais que podem ser utilizados para impressão 3D, materiais poliméricos termoplásticos, como o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) (Tymrak et al., 2014), (Sun et al., 2008) e ácido polilático (PLA) (Tymrak et al., 2014), (Melnikova et al., 2014), podem ser processados por esta tecnologia.

Os tipos mais comuns de impressora 3D encontrados são as que utilizam as técnicas estereolitografia (SL) e modelagem por fusão e deposição (FDM) (Wong; Hernandez, 2012). Segundo Takagaki (2012), as impressoras pessoais que estão se difundindo no mercado utilizam a técnica FDM por ser a mais simples e consequentemente mais barata.

Segundo Giordano et al. (2016) a manufatura aditiva tem se tornado capaz de inovar os processos produtivos, modificando as estratégias de produção empregadas atualmente. Devido à economia de materiais e redução das etapas do processo de fabricação que a impressão 3D apresenta, o interesse das empresas pela adoção desta tecnologia em seus processos de fabricação e desenvolvimento de produto tem aumentado.

De acordo com Cunico (2014), a impressão 3D apresenta um conceito de fabricação diferenciado, pois como cada camada do objeto é criada sequencialmente, isto permite a obtenção de estruturas internas mais complexas que os processos convencionais de moldagem ou fundição, o que torna este processo interessante para utilização em áreas como design e engenharia.

Porém, mesmo com as vantagens que este processo apresenta em relação aos processos de fabricação convencionais, atualmente a aplicação industrial do processo de impressão 3D ainda enfrenta desafios em relação à qualidade da superfície das peças produzidas, como exemplo pode-se citar as marcas dos filamentos depositados ou marcas dos degraus de deposição (também chamado de efeito escada) que as peças fabricadas por impressoras 3D FDM apresentam como pode ser observado nas figuras 1 e 2. Devido a estas marcas é necessário realizar um processo de acabamento

manual da superfície, como polimento ou pintura com tintas de recobrimento, após o termino da fabricação do objeto (Cunico, 2014).

FIGURA 1 - Exemplo de acabamento superficial de peça produzida por impressão 3D FDM. Fonte: Adaptado de Cunico (2014)

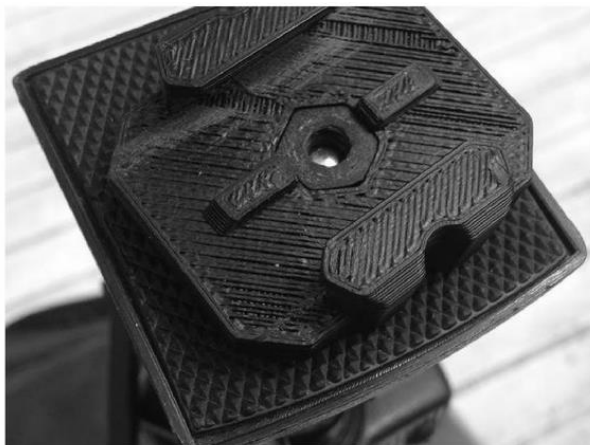
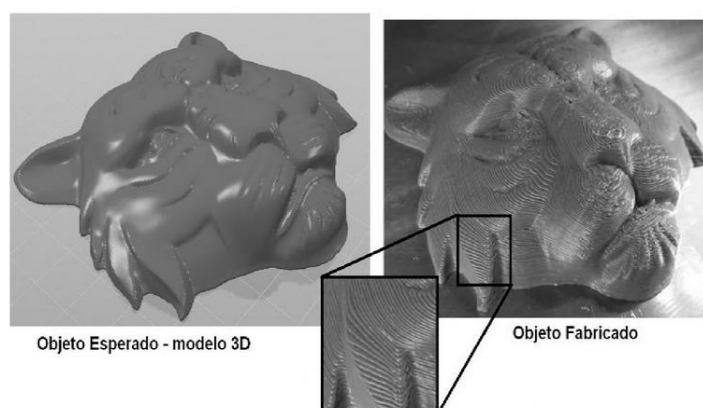


FIGURA 2 - Exemplo de marcas de degraus de deposição (Efeito escada). Fonte: Adaptado de Cunico (2014)



Devido a estas dificuldades encontradas neste tipo de processamento, o estudo de caracterização dos materiais utilizados para impressão 3D se torna necessário, para entender o comportamento das peças em relação às variações dos parâmetros do processo, e assim ser possível fornecer dados aos utilizadores destas impressoras e tornar o processo confiável o suficiente para aplicações industriais (Sood et al., 2012).

Em relação ao desgaste de peças produzidas por FDM, Boparai et al. (2015) mostrou que quando submetidas à desgaste deslizante, peças de compósitos de Nylon6-Al-AIO₃, preparadas com diferentes proporções, apresentam maior resistência ao desgaste que peças de ABS.

Ainda sobre o comportamento de desgaste de peças produzidas por FDM submetidas a desgaste deslizante, em outro estudo Boparai et al. (2016) mostrou que os mecanismos de desgaste que ocorrem em peças de ABS são adesão e fadiga.

Com objetivo de entender o mecanismo que ocorre quando as peças processadas por FDM estão sujeitas a desgaste abrasivo, nenhum estudo significativo foi encontrado e para preencher esta lacuna, o presente trabalho tem como foco avaliar o desgaste abrasivo de peças fabricadas por impressão 3D FDM.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 IMPRESSÃO 3D E TECNOLOGIA FDM

Os processos de impressão estão baseados em alguns passos que são comuns a todos eles, sendo o início do processo a criação de um modelo de computador 3D em malha, equivalente ao objeto a ser fabricado, que pode ser criado por dados de imagem adquiridos ou estruturas construídas em software CAD (computer-aided design) como AutoCAD 3D, SolidWorks, Catia Inventor e Google sketchup Pro. A segunda etapa é a conversão do arquivo do objeto desejado, que este no formato do software CAD utilizado, em um formato comum à impressora 3D, o qual normalmente é um arquivo STL (Surface Tessellation Language). O formato STL descreve as superfícies da peça, internas e externas, através do contorno da figura 3D. Após isto, escolhe-se um plano de referência do arquivo STL e um software divide o modelo tridimensional gerado em diversas camadas finas, sempre paralelas ao plano de referência escolhido e dispostas umas sobre as outras, gerando assim um arquivo de construção de camadas 2D e este é enviado para a impressora 3D que realizará a impressão do objeto (Wang et al., 2017)(Takagaki, 2012).

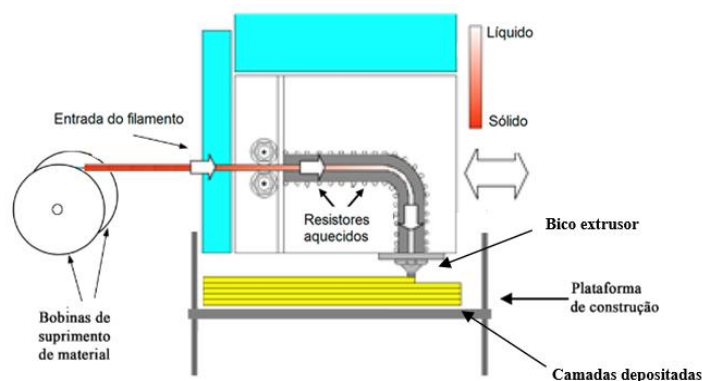
Em relação às suas aplicações, por exemplo, pode-se ser utilizada a impressão 3D de polímeros nas indústrias aeroespaciais para a criação de estruturas leves e complexas (Kroll; Artzi, 2011), na arquitetura para criar maquetes e modelos estruturais (Jahangir et al., 2018) e também em campos médicos para impressão de próteses personalizadas ao invés de utilizar produtos off-the-shelf que fazem uma aproximação grosseira das necessidades reais do paciente. (Murphy; Atala, 2014).

Atualmente a principal aplicação das impressoras 3D está nos setores de desenvolvimento de produtos, devido à possibilidade de criar protótipos reais, em pouco tempo e a custos aceitáveis e estes poderem ser testados com relação à sua forma, peso, ergonomia, resistência, cores ou encaixe de peças, reduzindo os erros de projeto a praticamente zero (Takagaki, 2012).

De acordo com Wong; Hernandez (2012), em relação aos tipos de impressoras, a distinção entre eles reside essencialmente em dois aspectos, que são o modo como as camadas de material são depositadas e o tipo de material utilizado. A tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM), é

caracterizada por utilizar a fusão do material seguida da extrusão do mesmo através de um bico que traça a geometria transversal da peça camada por camada e para este processo são utilizados termoplásticos e elastômeros. A seguir tem-se a figura 3 que apresenta o esquema do processo FDM.

FIGURA 3- Esquema do processo FDM. Fonte: Adaptado de Singh et al. (2017)



O material plástico é geralmente fornecido em forma de filamento, mas algumas configurações utilizam pellets de plástico alimentados a partir de uma tremonha. Para ocorrer a fusão do material, resistores localizados no bocal do equipamento mantêm o plástico a uma temperatura logo acima de seu ponto de fusão, de modo que ele flua facilmente através do bico e forme a camada (Novakova-Marcincinova; Kuric, 2012).

A primeira fase de impressão corresponde à delimitação do contorno da base da peça que se deseja construir, em seguida o bocal de impressão cobre o interior do contorno da base da peça com o plástico e tem-se a primeira camada de material. Uma vez que a primeira camada é construída, o bocal de impressão sobe milimetricamente, repetindo o processo depositando novas camadas. Este processo é repetido inúmeras vezes, até que seja obtida a forma final da peça, devido a isto, dependendo da complexidade e dimensão da peça, são necessárias várias camadas e assim o processo pode levar horas ou dias (Novakova-Marcincinova; Kuric, 2012).

Para a impressão 3D FDM, são utilizados materiais com baixo ponto de fusão (entre 68 °C e 270 °C) e baixa condução térmica e sendo assim, as resinas termoplásticas mais adequadas a este processo incluem poliéster, PP, ABS, ácido polilático (PLA), policarbonato (PC), PA, elastômeros e ceras. Entre estes, o ABS é o filamento termoplástico mais utilizado, pela facilidade de extrusão a altas temperaturas (estabilidade a diferentes temperaturas), combinado com as boas propriedades mecânicas que confere às peças, como por exemplo, resistência ao impacto e resistência química, além de baixo custo (Ebewe, 1996).

2.2. COMPORTAMENTO DE DESGASTE POLIMÉRICO

De acordo com Santiner; Czichos (1989), o uso de polímeros como recobrimentos é também uma consequência de intensas pesquisas de seu comportamento de desgaste. Os polímeros são muito usados em componentes de engenharia como engrenagens e eixos, onde a propriedade de lubrificação é muito explorada, evitando-se a necessidade de óleo ou graxa.

Um estudo realizado por Briscoe (1981) distinguiu os mecanismos de desgaste de polímeros em dois tipos: desgaste coesivo e interfacial.

O desgaste coesivo contempla mecanismos como abrasão e fadiga, ou, mais precisamente, a abrasão resultante da deformação plástica do polímero ou por crescimento de trinca na região deformada (deformação elástica). A deformação plástica ocorre devido às protuberâncias afiadas das superfícies do abrasivo e o resultado é o surgimento de riscos longitudinais no sentido do deslizamento na superfície desgastada. Já a deformação elástica é proveniente da interação de asperidades arredondadas das partículas duras, particularmente em elastômeros, e perfis na forma de escamas, perpendiculares a direção de deslizamento podem ser observados. O desgaste interfacial inclui a adesão e a reação triboquímica como mecanismos, os quais ocorrem na região próxima à zona de contato do par tribológico. O desgaste adesivo é o mais importante deles, ocorrendo quando o contracorpo apresenta rugosidade baixa e material é transferido ao contracorpo mais duro, posteriormente, removido como partícula de desgaste (Hutchings, 1992).

3. METODOLOGIA

Os corpos de prova (figura 5), de diâmetro 40 mm e espessura 5 mm, foram impressos utilizando-se a impressora da marca CTC, localizada no laboratório do Gima, na Universidade Federal do Paraná e filamento de ABS de diâmetro 1,75 mm. Foram utilizados os parâmetros de velocidade de impressão 50 mm/s, temperatura de extrusão 230°C e temperatura de plataforma de construção 110°C, os quais foram definidos por Messimer et al. (2019), em um estudo onde foram realizados testes em peças de ABS nos quais foi utilizado inicialmente as configurações recomendadas pelos fabricantes das impressoras e então ajustou-se os parâmetros de impressão para produzir a melhor combinação de velocidade de impressão e qualidade da peça.

Todas as amostras passaram por processo de lavagem utilizando água e detergente, seguido por secagem por corrente de ar forçada e aquecida. Após a limpeza, foi utilizada uma balança digital analítica, da marca Shimadzu, com precisão 0,001 g para verificar a massa inicial dos discos. Após submeter as amostras ao desgaste, o mesmo processo de limpeza foi utilizado antes da aquisição da massa ao final do ensaio.

O ensaio de desgaste foi realizado com um tribômetro da marca CSEM Instruments, localizado no conjunto de laboratórios multiusuário, da Universidade Estadual de Ponta Grossa. O procedimento do ensaio foi conforme norma ASTM G99, utilizando-se como parâmetros, carga de 10 N, velocidade de deslizamento 0,1 m/s, distância de deslizamento 40 metros e condições de temperatura e umidade ambiente (22 ± 3 ° C e 58 ± 4 de umidade relativa). Foi utilizado um pino com uma esfera de rolamento de 10 mm de diâmetro, de aço cromo AISI 52100 – 100 Cr6.

4. RESULTADOS

Inicialmente calculou-se a densidade inicial dos corpos de prova, considerando-se sua massa e volume. Segue abaixo tabela 1 com os resultados:

TABELA 1 – Valores de densidade dos corpos de prova

Amostra	Volume inicial (mm ³)	Densidade inicial (g/mm ³)
1	6283,19	0,0008066
2	6283,19	0,0008101
3	6283,19	0,0008062

Fonte: A autora (2019).

Após a limpeza dos corpos de prova, estes foram então pesados e submetidos aos ensaios de desgaste. Por fim, repetiu-se o processo de limpeza dos mesmos e conferiu-se novamente o peso de cada um.

Com os valores de massa inicial e final, calculou-se a perda de massa dos corpos de prova e este valor foi convertido em perda de volume em milímetros cúbicos. Para a conversão de perda de massa em perda de volume foi utilizada a equação 01, definida pela norma ASTM G99.

$$V = W / \rho \quad (1)$$

Onde:

V = Perda de volume (mm³)

W = Perda de massa (g)

ρ = Densidade corpo de prova

Na tabela 2 abaixo, encontram-se os valores de perda de volume dos corpos de prova, obtidos após o ensaio de desgaste.

TABELA 2 – Valores de perda de volume dos corpos de prova após ensaio de desgaste

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)	Perda de volume (mm ³)
1	5,0679	5,0644	0,0035	4,3393
2	5,0899	5,0873	0,0026	3,2095

3	5,0654	5,0617	0,0037	4,5895
---	--------	--------	--------	--------

Fonte: A autora (2019)

Em média, os corpos de prova perderam 4,0641 mm³ de volume. Este valor corresponde à 0,06% de seu volume inicial.

Considerando-se os 40 m de deslizamento, os corpos de prova apresentaram em média uma taxa de desgaste de 10,1153 x 10⁻² mm³/m. Sendo o volume abaixo da esfera do pino de 1696,47 mm³, seriam necessários 16771,3 m de deslizamento para romper a amostra.

Friedrich et al (2002) mostram valores de desgaste em polímeros, tais como, polipropileno (PP) e PEEK, tendo obtido valores da taxa de desgaste na ordem de 10⁻⁵ mm³/m.

O coeficiente de desgaste dos corpos de prova, foi calculado utilizando-se a equação 2 a seguir.

$$K = W / L \cdot P \cdot \rho \quad (2)$$

Onde:

K = Coeficiente de desgaste (mm³/N.mm)

W = Perda de massa (g)

L = Distância de deslizamento (mm)

P = Carga aplicada (N)

ρ = Densidade corpo de prova (g/mm³)

Na tabela 3 abaixo, encontram-se os valores de coeficiente de desgaste dos corpos de prova.

TABELA 3 – Valores de coeficiente de desgaste dos corpos de prova submetidos ao ensaio de desgaste

Amostra	Coeficiente de desgaste (mm ³ /N.mm)
1	1,1 · 10 ⁻⁵
2	0,8 · 10 ⁻⁵
3	1,1 · 10 ⁻⁵

Fonte: A autora (2019).

Em média, os corpos de prova apresentaram coeficiente de desgaste de 10⁻⁵ mm³/N.mm.

Shipway et al (2003) encontraram valores do coeficiente de desgaste (K) para polímeros como PETG em torno de 8,5 x 10⁻⁵ mm³/N.mm. Palabiyik e Bahadur(2002) citam valores de 4,33 x 10⁻⁵ mm³/N.mm para o coeficiente de desgaste de polietileno de alta densidade (HDPE).

O coeficientes de atrito dos corpos de prova, registrados pelo tribômetro, são apresentados na tabela 4.

TABELA 4 – Valores de coeficiente de atrito dos corpos de prova submetidos ao ensaio de desgaste

Amostra	Coeficiente de atrito (μ)
---------	---------------------------------

1	0,2783
2	0,1029
3	0,4789

Fonte: A autora (2019).

Em média, os corpos de prova apresentaram coeficiente de atrito igual a 0,2867.

Unal et al(2003) apresentam valores de coeficientes de atrito, para teflon (PTFE), de 0,06.

Em geral, a perda de volume do material polimérico é devida à abrasão e adesão e, muitas vezes, começa com a abrasão (Naga Raju et al., 2011). Analisando a superfície da esfera utilizada no pino do ensaio de desgaste foi possível identificar características de desgaste adesivo devido à transferência de massa do corpo de prova para a superfície da esfera, conforme pode ser observado na figura 4.

FIGURA 4 – Adesão de ABS à esfera do pino utilizado no ensaio de desgaste. Fonte: A autora (2019).



5. CONCLUSÃO

Os valores de perda de volume encontrados são relativamente baixos em relação ao volume inicial dos corpos de prova. Porém, a taxa de desgaste encontrada na ordem de 10^{-2} mm³/m quando comparada à de outros polímeros como polipropileno, teflon e PEEK, pode ser considerada alta. Da mesma forma, o coeficiente de atrito dos corpos de prova de ABS também se apresentou mais alto em relação ao coeficiente de atrito de polímeros como, por exemplo, teflon.

Em relação ao coeficiente de desgaste (K), quando comparado ao de polímeros como PETG e PEEK, os corpos de prova de ABS apresentaram valores mais baixos.

O mecanismo de desgaste atuante identificado foi o mecanismo de adesão, evidenciado com a transferência de massa do corpo de prova de ABS para a superfície da esfera do pino utilizado no ensaio.

REFERÊNCIAS

- ASTM INTERNATIONAL, *F2792-12a*: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2013.
- ASTM INTERNATIONAL, *G99 – 17*: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, 2017.
- BOPARAI, K.; SINGH, R.; SINGH, H. Comparison of tribological behaviour for Nylon6-Al-Al₂O₃ and ABS parts fabricated by fused deposition modelling. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 10, n. 2, p. 59–66, 2015.
- BOPARAI, K.; SINGH, R.; SINGH, H. Wear behavior of FDM parts fabricated by composite material feed stock filament. *Rapid Prototyping Journal*, v. 22, n. 2, p. 350-357, 2016.
- BRISCOE, B. Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. *Tribology International*, v. 14, n. 4, p. 231–243, 1981.
- CUNICO, M. W. M. Impressoras 3D: O novo meio produtivo. Curitiba: Concept 3D, 2014.
- EBEWELE, R. O. *Polymer Science and Technology*. Nova York: CRC Press LLC, 1996.
- FRIEDRICH, K.; REINICKE, R.; ZHANG, Z. Wear of polymer composites, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, v. 216, n. 6, p. 415-426, 2002.
- GIORDANO, C. M.; ZANCUL, E. DE S.; RODRIGUES, V. P. Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. *Revista Produção Online*, v. 16, n. 2, p. 499–523, 2016.
- HULL, C. W.; ARCADIA, C. *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, 1986.
- HUTCHINGS, I. M. *Tribology Friction and Wear of Engineering Materials*. Londres: Arnold, 1992.
- JAHANGIR, M. N.; MAMUN, M. A. H.; SEALY, M. P. A Review of Additive Manufacturing of Magnesium Alloys. In: American Institute of Physics (Org.); AIP Conference Proceedings. *Anais...*, 2018.
- KROLL, E.; ARTZI, D. Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models. *Rapid Prototyping Journal*, v. 5, n. September 2010, p. 393–402, 2011.
- MELNIKOVA, R.; EHRMANN, A.; FINSTERBUSCH, K. 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. *Anais...*, v. 62, 2014.

- MESSIMER, S.; PEREIRA, T.; PATTERSON, A.; LUBNA, M.; DROZDA, F. Full-Density Fused Deposition Modeling Dimensional Error as a Function of Raster Angle and Build Orientation: Large Dataset for Eleven Materials. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 3, n. 1, p. 6, 2019.
- MURPHY, S. V; ATALA, A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*, v 32, n. 8, p. 773-785, 2014.
- NAGA RAJU, B.; RAMJI, K.; PRASAD, V.S.R.K. Studies on tribological properties of zno filled polymer nanocomposites. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 6, p. 75-82, 2011.
- NOVAKOVA-MARCINCINOVA, L.; KURIC, I. Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology. *Manuf. and Ind. Eng*, v. 11, n. 1, p. 1338–6549, 2012.
- PALABIYIK, M. & BAHADUR, S. Tribological studies of polyamide 6 and high-density polyethylene blends filled with PTFE and cooper oxide and reinforced with short glass fibers. *Wear*, v. 253, p. 369-376, 2002.
- SANTINER, E.; CZICHOS, H. Tribology of Polymers. *Tribology International*, v. 22, n. 2, p. 103–109, 1989.
- SHIPWAY, P.H.; NGAO, N.K. Microscale abrasive wear of polymeric materials. *Wear*, v. 255, p. 742-750, 2003.
- SINGH, R.; SINGH, N.; AMENDOLA, A.; FRATERNALI, F. On the wear properties of Nylon6-SiC-Al₂O₃ based fused deposition modelling feed stock filament. *Composites Part B*, v. 119, p. 125–131, 2017.
- SOOD, A. K.; EQUBAL, A.; TOPPO, V.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. An investigation on sliding wear of FDM built parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 5, n. 1, p. 48–54, 2012.
- SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008.
- TAKAGAKI, L. Tecnologia de impressão 3D. *Revista Inovação Tecnológica*, v. 2, n. 2, p. 28-40, 2012.
- TYMRAK, B. M.; KREIGER, M.; PEARCE, J. M. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design*, v. 58, p. 242–246, 2014.
- WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B*, v. 110, p. 442–458, 2017.

WONG, K. V.; HERNANDEZ, A. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, v. 2012, n. 1, p. 1–10, 2012.